第 37 卷第 5 期 生 态 学 报 Vol.37,No.5
2017 年 3 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Mar.,2017

DOI: 10.5846/stxb201510031996
谭羽, 杨万勤, 廖姝, 彭艳, 李俊, 吴福忠.川西高寒生态系统不同海拔土壤动物对冬季凋落叶腐殖化过程的影响.生态学报,2017,37(5):1595-1602.
Tan Y, Yang W Q, Liao S, Peng Y, Li J, Wu F Z.Effects of soil fauna on winter litter humification along an altitudinal gradient in cold ecosystems in western Sichuan.Acta Ecologica Sinica,2017,37(5):1595-1602.

川西高寒生态系统不同海拔土壤动物对冬季凋落叶腐殖化过程的影响

谭 羽[1,2], 杨万勤[1,2], 廖 姝[1,2], 彭 艳[1,2], 李 俊[1,2], 吴福忠[1,2,*]
1 四川农业大学林业生态研究所, 成都 611130
2 林业生态工程重点实验室, 成都 611130

摘要:凋落叶在冬季的腐殖化过程是高寒生态系统土壤有机质形成和碳固定的重要阶段,并可能受到严酷冻结环境下仍具有一定活性的土壤动物的影响,但缺乏必要的关注。因此,以川西高山峡谷区海拔 3000、3600、4000m 的高寒森林和草甸典型凋落叶为研究对象,采用不同孔径大小的凋落物网袋去除土壤动物的方法,根据凋落叶的自然腐解过程,于 2013 年 11 月—2014 年 4 月研究了不同冻融时期(冻结前期、深冻期、融化期)土壤动物对凋落叶腐殖化过程的作用。结果表明:通过对色调系数($\Delta\log K$)和光密度值(E_4/E_6)值的分析,在高寒生态系统中,冬季随着温度的降低土壤动物促进了凋落叶的腐殖化,而随着温度的升高土壤动物抑制了凋落叶的腐殖化。深冻期土壤动物对海拔 3000m 的森林凋落叶腐殖化过程具有显著促进作用;在冻结前期土壤动物对海拔 3600m 森林凋落叶腐殖化过程具有显著促进作用;而融化期土壤动物对海拔 4000m 的草甸凋落叶腐殖化过程具有显著的抑制作用;其他海拔和时期没有显著影响。冻结初期土壤动物对凋落叶的腐殖化速率的作用高于深冻期和融化期,腐殖化度在深冻期达到最大值。这些结果表明气候变化情景下冬季变暖可能导致土壤动物抑制凋落物腐殖化,减少凋落物向土壤有机质的转化。

关键词:腐殖化;土壤动物;凋落叶; 色调系数; 光密度值

Effects of soil fauna on winter litter humification along an altitudinal gradient in cold ecosystems in western Sichuan

TAN Yu[1,2], YANG Wanqin[1,2], LIAO Shu[1,2], PENG Yan[1,2], LI Jun[1,2], WU Fuzhong[1,2,*]
1 *Institute of Ecology and Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu* 611130, *China*
2 *Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering, Chengdu* 611130, *China*

Abstract: Foliar litter humification is one of the main mechanisms of carbon sequestration, and is essential in forming soil organic matter from foliar litter. Soil fauna is a type of decomposer that can influence litter humification. It was previously believed that soil fauna were dormant during the winter in cold biomes, and thus their activities were not considered to affect litter humification. However, recent studies have documented that some cold tolerant soil fauna remain active during the winter. However, little is known about the effects of soil fauna on litter humification during the winter in cold biomes. Therefore, a field experiment with different sizes of litterbags was conducted on three cold biomes along different altitudinal gradients in the eastern Tibet Plateau. Two species were selected to study litter decomposition at each of the three biomes: *Betula albo-sinensis* and *Abies faxoniana in the* subalpine forest at 3000 m, *Sabina saltuaria* and *Salix paraplesia* in the

基金项目:国家自然科学基金重点项目(31270498,31170423);四川省杰出青年学术与技术带头人培育项目(2012JQ0008,2012JQ0059);中国博士后科学基金特别资助项目(2012T50782);高等学校博士学科点专项科研基金(20135103110002)

收稿日期:2015-10-03; **网络出版日期**:2016-07-13

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wufzchina@163.com

alpine forest at 3600m, and *Ajania nubigena* and *Carex atrofusca* in the alpine meadow at 4000 m. Litterbags were placed before the soil completely froze in November, 2013. Litterbags were sampled at the onset of three stages—freezing, deep freezing, and thawing—from 2013 to 2014. Tone coefficient ($\Delta \log K$) and optical density value (E_4/E_6) were analyzed to determine the litter humification levels. The results showed that soil fauna promoted leaf litter humification as the temperature decreased, and suppressed leaf litter humification as the temperature increased during the winter in cold ecosystems. The effects of soil fauna on the process of leaf litter were regulated by altitude and litter species. The effect of soil fauna on leaf litter humification decreased as the altitude increased. Soil fauna increased litter humification at 3000m during the deep freezing stage and at 3600m at the onset of the freezing stage. However, soil fauna inhibited litter humification at 4000m during the thawing stage. Furthermore, soil fauna did not affect litter humification at other altitudes and sampling stages. The effects of soil fauna on litter humification rate at the onset of freezing stage were higher than those of the deep freezing stage and thawing stage, and humification rate peaked during the deep freezing stage. These results suggest that the activities of soil animals could promote humus formation from litter as the temperature decreases, indicating a possible increase in soil carbon sequestration. Together, these data provide a new understanding of soil organic matter formation and the carbon budget in cold ecosystems.

Key Words: humification; soil fauna; leaf litter; tone coefficient; optical density value

腐殖质作为土壤有机质的主体,代表了土壤中相对稳态的有机碳库[1]。其形成过程也是土壤有机质形成中重要的生物化学过程[2]。高寒森林常年受地质灾害及低温等自然因素的影响,土壤发育缓慢[3],森林凋落叶的腐殖化是其土壤有机质的形成和碳固定的重要过程。土壤动物作为陆地生态系统物质循环和能量流动的积极参与者[4],对土壤有机碳的稳定性起着重要的直接或间接的调控作用[5]。由于冬季雪被斑块的隔热、保温作用为土壤动物的存活提供了有利环境[6],在高寒森林冬季土壤冻结环境条件下仍有土壤动物活动,但是在这一环境中土壤动物是否对凋落物腐殖化具有明显作用这方面缺乏关注。在国内外大量 SOC 稳定机制的研究中,对土壤生物过程和贡献机制的研究相对不足[7-8]。季节性冻融过程是高纬度高海拔地区普遍存在的自然现象[9-10],对土壤动物的群落结构和多样性产生了显著的影响[6,11]。由于不同海拔高寒生态系统在冻结初期、深冻期和融化期的环境条件具有明显变化[12],土壤动物对凋落物腐殖化过程的作用也可能存在较大的差异性,但缺乏必要关注,亟待深入研究。

位于长江上游和青藏高原东麓的川西高山森林是西南林区的主体,在水源涵养、水土保持、碳吸存以及指示全球气候变化等方面具有重要且不可替代的作用[13]。前期的研究表明该区域每年季节性冻融期长达 5—6 个月[6]且冻融循环和冻结作用显著影响土壤动物群落结构[14]。在此期间,土壤动物对凋落物分解等生态过程有着显著贡献[15]。本文在已有研究的基础之上,采用凋落物袋法,对川西高山峡谷区海拔 3000m 高寒森林典型凋落叶红桦(*Betula albo-sinensis*)和冷杉(*Abies faxoniana*)、3600m 高寒森林典型凋落叶方枝柏(*Sabina saltuaria*)和康定柳(*Salix paraplesia*)、4000m 高山草甸典型凋落叶黄花亚菊(*Ajania nubigena*)和黑褐苔草(*Carex atrofusca*)为对象,研究了高寒森林季节性冻融期土壤动物对凋落物腐殖化过程的影响,以期为川西高山/亚高山森林、高山草甸生态系统凋落叶向有机质转化的关键过程提供一定的基础数据。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于研究区位于青藏高原东缘与四川盆地过渡带,四川省阿坝藏羌族自治州理县米亚罗自然保护区,我们分别选取了 3000、3600、4000m 海拔为典型样地。海拔 3000m 样地(102.53°— 102.57° E, 31.14°—31.19° N)年平均气温 3.6 ℃,最高气温 24.8 ℃,最低气温-15.8 ℃,年均降雨量约 850 mm。每年 10 月至次年 4 月为季节性冻融期,冻融作用明显,植被类型乔木层优势树种有岷江冷杉(*Abies faxoniana*)、红桦(*Betula*

albo-sinensis),林下灌木主要有箭竹(*Fargesia spathacea*)、三颗针(*Berberis julianae*)等,土壤为发育在灰岩、页岩、板岩的棕壤和暗棕壤。海拔 3600m 样地(102.53°—102.57° E, 31.14°— 31.19° N)年平均气温 2— 4 ℃,最高气温 23 ℃,最低气温-18 ℃,年均降雨量约 850mm,植被类型乔木层优势树种主要为方枝柏(*Sabina saltuaria*)和岷江冷杉(*Abies faxoniana*),林下灌木主要有康定柳(*Salix paraplesia*)、高山杜鹃(*Rhododendron lapponicum*)等,土壤为发育在灰岩、页岩、板岩的棕壤和暗棕壤,土层浅薄。海拔 4000m 样地(31.85° N, 102.68° E)年均气温 6— 12 ℃,1 月均温-8 ℃,7 月均温 12.6 ℃,年降水量 600— 1100 mm。每年 10 月至次年 4 月为季节性冻融期,冻融作用明显。高山草甸位于林线交错地带,其土壤类型为高山草甸土。草本主要类型为黄花亚菊(*Ajania nubigena*)、黑褐苔草(*Carex atrofusca*)、细芒羊茅(*Festuca stapfii*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)等。

1.2 样地设置和样品处理

根据前期调查结果,于 2013 年 10 月,分别在海拔 3000m 样地收集红桦和冷杉新鲜凋落叶,海拔 3600m 样地收集方枝柏和康定柳新鲜凋落叶,海拔 4000m 样地收集黄花亚菊和黑褐苔草新鲜凋落叶,并将收集的新鲜凋落叶带回在实验室自然风干,然后称取凋落叶样品 10g,分别放入不同孔径大小(0.04mm 基本排除大、中、小型土壤动物和 3mm 基本允许所有土壤动物进入)的凋落物袋内。凋落物袋表层采用 0.04mm 和 3mm 的尼龙网,帖地面层均采用 0.04mm 的尼龙网。于 2013 年 11 月 12 日土壤冻结前期,在样地内随机选取 3 个坡向、坡度等相似的 5m×5m 的均质样方。然后去除样方内的凋落物和其他杂质,将凋落物袋随机平铺于地表。每个样方放置两种凋落物,每种凋落物袋分两种孔径,每个样地放置 108 个(1 个样地×3 个样方×2 个物种×2 个孔径×3 次重复×3 次采集)凋落物袋。每个物种各取相同质量(10g)的风干叶 3 袋,在 65℃下烘干至恒重,由其推算出放置在网袋内样品的初始干质量。

表 1　不同海拔各个关键时期日均温(AT)、昼均温(ADT)、夜均温(ANT)、正积温(PAT)、负积温(NAT)、冻融循环次数(NFTC)

Table 1　Average temperature (AT), average daytime temperature (ADT), average nighttime temperature (ANT), positive accumulated temperature (PAT), negative accumulated temperature (NAT), number of freeze-thaw cycles (NFTC) in different altitudes at various stages

海拔 Altitudes/m	关键时期 Time	日均温 AT/℃	昼均温 ADT/℃	夜均温 ANT/℃	正积温 PAT/℃	负积温 NAT/℃	冻融循环次数 NFTC
高寒森林 Alpine forest	OF	-3.10	0.33	-8.60	42.00	-169.04	32
3000	DF	-3.45	-1.00	-5.60	0.67	-266.50	49
	TS	2.22	5.30	-1.60	126.23	-24.25	41
	FTS	-4.33	4.63	-15.80	168.90	-459.79	122
高寒森林 Alpine forest	OF	-3.68	-2.16	-5.63	27.67	-178.38	23
3600	DF	-3.25	-1.80	-5.28	22.99	-273.38	42
	TS	3.97	7.79	1.29	184.90	-2.29	10
	FTS	-2.96	3.83	-9.61	235.55	-454.04	75
高山草甸 Alpine meadow	OF	-1.78	0.97	-7.62	33.63	-108.96	30
4000	DF	-3.81	-7.29	-6.35	6.04	-299.21	43
	TS	4.03	-1.89	-1.54	192.83	-8.17	28
	FTS	-1.56	-8.21	-15.51	232.49	-416.33	101

OF:冻结初期 Onset of freezing stage; DF:深冻期 Deep freezing stage; TS:融化期 Thawing stage; FTS:季节性冻融期 Freezing thawing stage

同时,根据当地气象资料和已有的研究显示,在研究区每年 10 月至次年 4 月为季节性冻融期。于 2013 年 11 月 13 日,在特定凋落物袋和高约 0.5m 的树枝上各放入 1 枚纽扣式温度记录器,将其设定为每 2 个小时自动记录 1 次。用以来计算凋落物袋和空气中冻结初期(2013-11-22—2013-12-22)、深冻期(2013-12-23—2014-3-9)、融化期(2014-3-10—2014-4-22)的日平均温度(AT)、昼平均温度(ADT)、夜平均温度(ANT)、正积温(PAT)、负积温(NAT)、冻融循环次数(NFTC)。

根据土壤季节性冻融(冻结初期 OF,深冻期 DF,融化期 TS)于 2013 年 12 月 22 日,2014 年 3 月 9 日,

2014 年 4 月 22 日进行 3 次样品的采集,每次样品的采集是从 3 个样地的一个样方中采集 12 个凋落叶袋(2 物种×2 孔径×3 重复),总共采集 108 个凋落叶袋。将凋落叶袋密封带回实验室进行风干,粉碎,过 0.45mm 的筛。称取 0.5g 风干样置于锥心瓶中,加入 100mL 0.1 mol/L NaOH 和 0.1 mol/L $Na_4P_2O_7$混合提取液加塞振荡 10min,将其放入 100℃ 水浴锅中 30min,带溶液冷至常温后,将其过 0.45mm 的滤膜,所过滤出来的黑色液体及为浸提液。用紫外可见光谱分析仪分析仪(TU 1901, Puxi, Beijing, China)测量其吸光率以及计算色调系数($\Delta\log K$)和光密度值(E_4/E_6)[16]。

图 1　季节性冻融期间高寒生态系统 3 个海拔凋落物袋日平均温度

Fig.1　The daily average temperature of letter- bags in three cold ecosystems with different altitudes in the freeze- thaw season

1.3　数据统计与分析

一般用 $\Delta\log K$ 值和 E_4/E_6比值来表征土壤腐殖质的复杂程度,$\Delta\log K$ 值越大,E_4/E_6比值越高,光密度愈小,芳香缩合度低,说明其分子结构越简单[17]。同时,$\Delta\log K$ 和 E_4/E_6值呈正相关关系,也就是说 $\Delta\log K$ 和 E_4/E_6值越高,说明腐殖质分子结构越简单;反之,$\Delta\log K$ 和 E_4/E_6值越低,其分子结构越复杂[18]。

$\Delta\log K$ 和 E_4/E_6的计算公式如下:

$$\Delta\log K = \log(A_{400}/A_{600})$$

$$E_4/E_6 = A_{465}/A_{665}$$

式中,A_{400}、A_{600}、A_{465}、A_{665}表示当波长为 400、600、465、665 时的吸光率。

数据采用 SPSS 20.0 (IBM SPSS Statistics Inc., Chicago, IL, USA)进行检验分析和方差分析、Origin Pro8.6(Origin Lab, Northampton, MA, USA)进行绘图。运用 T 检验中配对样本 T 检验(Paired-Samples T Test)分析不同孔径中有或无土壤动物对凋落物腐殖化过程的影响及其差异显著性;用多因素方差分析检验不同关键时期和凋落物质量对凋落物的腐殖化的影响。显著性水平为 $P \leqslant 0.05$。数值用平均值±标准偏差表示。

2　结果与分析

2.1　$\Delta\log K$ 值

由图 2 可知,经过整个冬季,土壤动物对海拔 3000、3600m 和 4000m 六种凋落叶 $\Delta\log K$ 值的作用均不明显,但促进了海拔 3600m 两种凋落叶的 $\Delta\log K$ 值。然而,在海拔 3600m 冬季不同时期不同物种凋落叶的 $\Delta\log K$ 值的影响具有明显的差异($F=14.17, P<0.001$)(表 2)。在不同时期土壤动物对 3600m 凋落叶 $\Delta\log K$ 值有显著的差异($F=26.33, P<0.001$)。冻结初期,土壤动物明显促进了方枝柏和康定柳两种凋落叶的 $\Delta\log K$ 值,对红桦、冷杉、黄花亚菊和黑褐苔草 4 种凋落叶的 $\Delta\log K$ 值没有显著的影响。深冻期,土壤动物除了明显促进了方枝柏凋落叶的 $\Delta\log K$ 值之外,对其他红桦、冷杉等 5 种凋落叶没有显著的影响。融化期,土壤动物对 3 个海拔 6 个物种凋落叶的 $\Delta\log K$ 值都没有显著的影响。

2.2　E_4/E_6值

通过对 E_4/E_6值的分析,土壤动物分别促进了海拔 3000m 和 3600m 4 种凋落叶的 E_4/E_6值,抑制了海拔 4000m 两种凋落叶的 E_4/E_6值(图 3)。海拔 3000m 冬季不同关键时期土壤动物对不同海拔不同物种的 E_4/E_6值的影响有显著的影响($F=3.64, P<0.05$)(表 2)。在不同时期土壤动物对凋落叶 E_4/E_6值的作用各不相同。土壤冻结前期,土壤动物明显促进了方枝柏和康定柳凋落叶的 E_4/E_6值,对红桦、冷杉、黄花亚菊和黑褐苔草 4 种凋落叶的 E_4/E_6值没有显著的促进作用。深冻期,土壤动物明显促进了红桦、冷杉和康定柳 3 种凋落叶的 E_4/E_6值,但对方枝柏、黄花亚菊和黑褐苔草是 3 种凋落叶的 E_4/E_6值没有显著影响。融化期,土壤动物明显降低

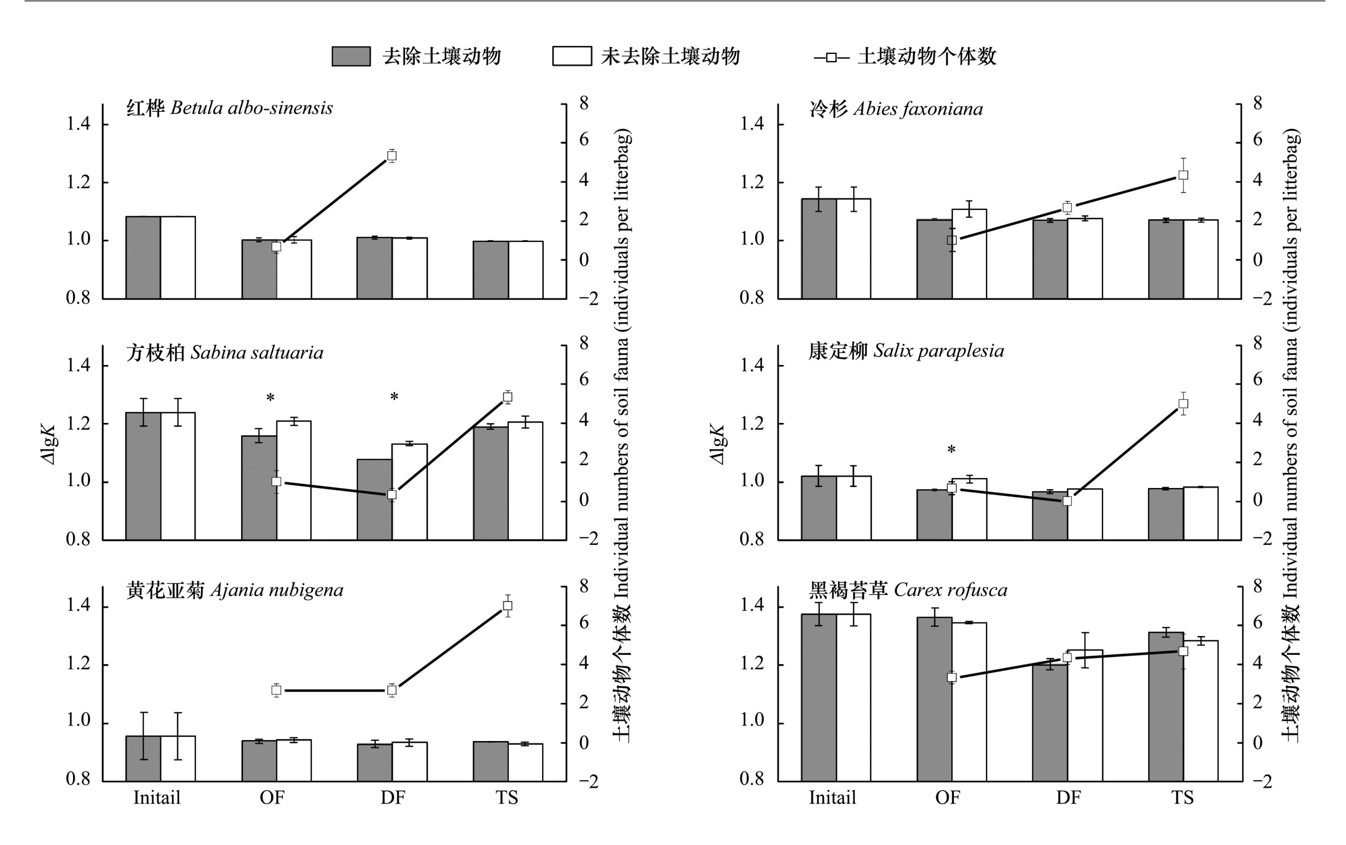


图 2　不同海拔 6 种凋落叶在不同关键时期的 $\Delta \log K$ 值和土壤动物个体数

Fig.2　$\Delta \log K$ values and soil fauna individual numbers of six litters at different critical stages in various altitudes

OF：冻结初期 Onset of freezing stage；DF：深冻期 Deep freezing stage；TS：融化期 Thawing stage；图中 * 表示同一物种有无土壤动物之间的差异显著性（* $P<0.05$；** $P<0.01$；*** $P<0.001$）；图中数据为平均值加减标准差（$n=3$）

了黑褐苔草和黄花亚菊凋落叶的 E_4/E_6值，对其他 4 种凋落叶的 E_4/E_6值没有显著作用（图 3）。

2.3　不同生态系统土壤动物对凋落叶腐殖化的作用

土壤动物对凋落叶腐殖化过程的作用在不同海拔和不同物种之间存在一定的差异性。单因素方差分析表明，土壤动物对凋落叶腐殖化的作用随着海拔的增加，其受海拔的影响显著减小。在海拔 3600m 高寒森林生态系统中土壤动物极显著的影响了 $\Delta \log K$ 值（$F=18.484$，$P<0.001$），并且显著影响了 E_4/E_6的值（$F=4.662$，$P<0.05$）。在海拔4000m高山草甸生态系统土壤动物显著影响了E_4/E_6值（$F=4.836$，$P<0.05$）（表2）。土

表 2　不同海拔土壤动物（Soil fauna）、物种（Litter）、关键时期（Time）对 $\Delta \log K$ 和 E_4/E_6的三因素方差分析

Table 2　Three-factor analysis of variance of $\Delta \log K$ and E_4/E_6 to soil fauna, litter and time at various altitudes

因子 Factor	自由度 df	3000m		3600m		4000m	
		$\Delta \log K$ F	E_4/E_6 F	$\Delta \log K$ F	E_4/E_6 F	$\Delta \log K$ F	E_4/E_6 F
土壤动物 Soil fauna	1	0.46	0.21	18.48***	4.66*	0.01	4.83*
物种 Litter	1	188.18***	8.58*	763.63***	308.21***	775.05***	70.86***
关键期 Time	2	2.6	16.11***	26.33***	8.76**	9.39***	0.93
土壤动物（物种） Soil fauna（Litter）	1	4.24*	0.24	2.73	2.86	0.01	4.94*
土壤动物（关键期） Soil fauna（Time）	2	1.34	15.25***	2.11	0.61	1.16	0.09
物种（关键期） Litter（Time）	2	1.98	9.04***	14.17***	5.32**	7.16	0.61
土壤动物（物种）（关键期） Soil（Litter）（Time）	2	0.47	3.64*	0.73	1.25	0.71	0.16

* $P<0.05$；** $P<0.01$；*** $P<0.001$. $n=12$

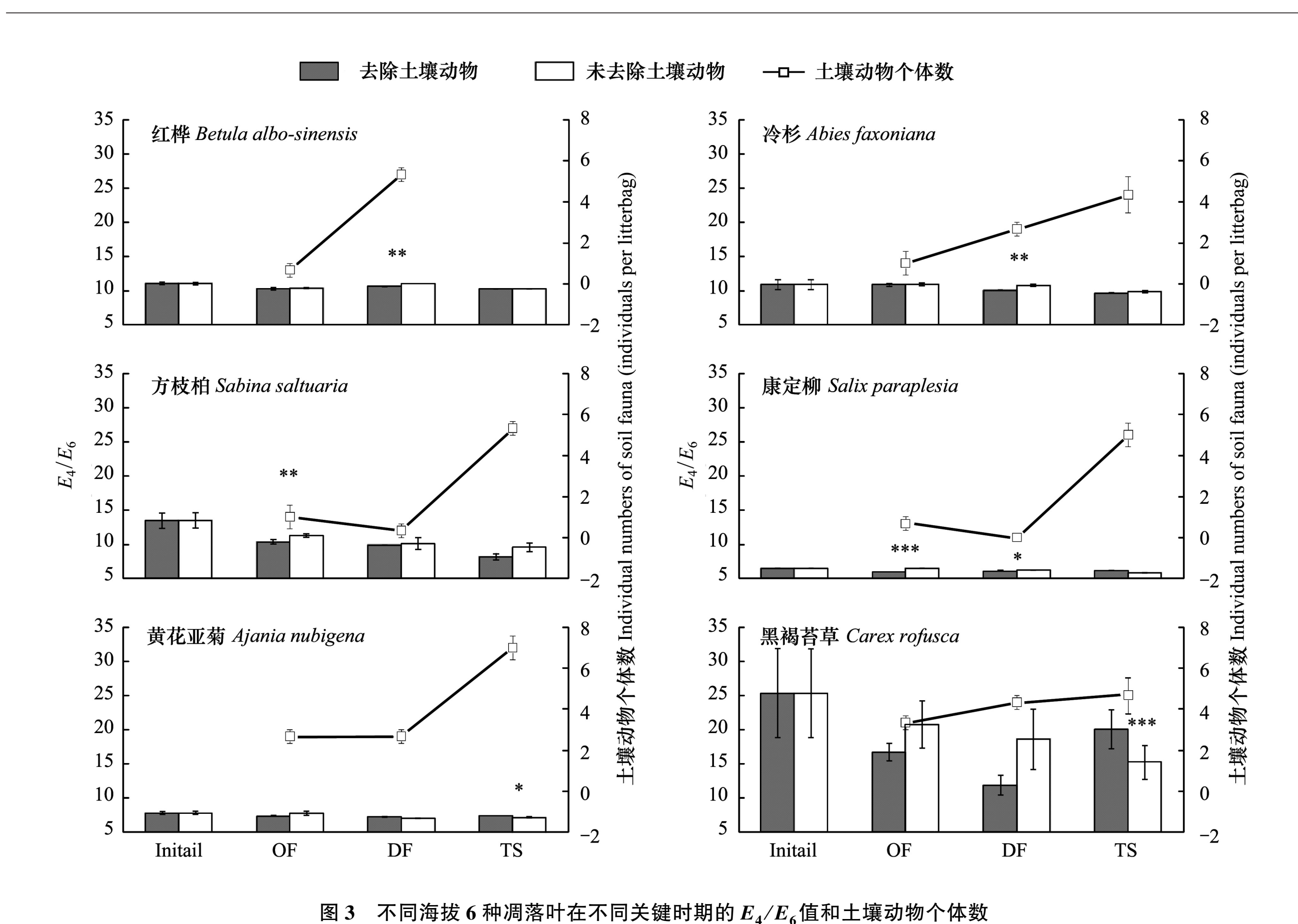


图 3 不同海拔 6 种凋落叶在不同关键时期的 E_4/E_6 值和土壤动物个体数

Fig.3 E_4/E_6 values and soil fauna individual numbers of six litters at different critical stages

OF：冻结初期 Onset of freezing stage；DF：深冻期 Deep freezing stage；TS：融化期 Thawing stage；图中＊表示同一物种有无土壤动物之间的差异显著性（＊ $P<0.05$；＊＊ $P<0.01$；＊＊＊ $P<0.001$），图中数据为平均值加减标准差（$n=3$）

壤动物对海拔 3000m 的高寒森林生态系统的 $\Delta \log K$ 值和 E_4/E_6 值没有显著的影响。在同一生态系统环境下不同物种对 $\Delta \log K$ 值和 E_4/E_6 值都表现出极显著的影响。土壤动物对海拔 3000m 不同物种的 $\Delta \log K$ 值有显著影响（$F=4.24$, $P<0.05$），同时显著影响了海拔 4000m 的 E_4/E_6 值（$F=4.94$, $P<0.05$）。在不同关键时期土壤动物显著影响了海拔 3000m 的 E_4/E_6 值（$F=15.25$，$P<0.001$）。相关性分析表明在冻结初期冻融循环次数与 E_4/E_6 值呈显著的正相关关系（$P<0.05$）。

3 讨论和结论

土壤动物是指其生活中有一段时间定期在土壤中渡过并且对土壤有一定影响的动物[19]，它们以土壤有机物质（包括腐殖物质和非腐殖物质）或其他生物为食[20]，对凋落叶的降解和腐殖物质的形成有积极作用[21]。本研究发现冬季不同关键时期土壤动物对不同海拔凋落叶腐殖化过程的影响各有不同，且随着温度的降低，土壤动物表现出促进凋落物腐殖化的现象（图 2）。这些结果一方面表明随着冬季冻结加深和海拔升高，土壤动物可能加快凋落物向土壤有机质的转化，促进土壤碳固定；另一方面也说明温度的降低可能抑制了土壤动物的活动，减小了对凋落物的消耗和降解。

冬季高寒森林季节性冻融剧烈[9-10]，受温度和季节性冻融的影响，研究发现冻结前期凋落叶的腐殖化过程较深冻期和融化期要快，在深冻期 $\Delta \log K$ 值到达最低，融化期有相对回升（图 2）。在冻结前期，土壤动物对海拔 3600m 方枝柏和康定柳凋落叶的腐殖化过程具有显著的促进作用，其他海拔的物种有一定的促进作用但是不显著（图 3）。在冻结初期，正是衰老叶片凋落高峰期，大量的新鲜凋落叶掉落到地表为土壤动物提供了充足的食物[22]；同时雪被的形成，其隔热作用有效保护了微生物活性[6]，因此在冻结初期微生物活动驱

动[23-24]的腐殖物质累积可能更多。但是,由于不同海拔和不同植被特征影响了土壤动物的多样性及其结构[25],以及土壤动物对不同物种的影响有一定的差异导致在这一阶段土壤动物对其他 4 种凋落叶无显著影响。

腐殖物质在冻结初期快速的累积,在深冻期整个冬季的腐殖化程度达到最高值。本文通过 E_4/E_6 比值发现,深冻期土壤动物对红桦、冷杉和康定柳 3 种凋落叶腐殖物质的形成有显著促进作用,对其他物种没有显著的影响(图 3)。在初冻期和深冻期,雪被覆盖在凋落叶表面达到了保温隔热的作用,有利于土壤动物和微生物的活动[10],从而促进凋落叶的腐殖化。并且在海拔 3000m 凋落物袋中的温度较海拔 3600m 和 4000m 温度较为稳定(图 1),为土壤动物营造了良好的外部环境条件有利于土壤动物的活动。同时由于康定柳凋落叶是属于落叶阔叶林凋落叶,而方枝柏凋落叶是常绿针叶凋落叶,土壤动物对凋落叶的破碎作用的差异直接影响凋落物的分解。沿海拔高度上植被类型的差异,导致了其土壤动物和微生物群落和结构产生差异[26],从而影响了凋落叶腐殖化过程的不同。

在融化期,随着温度的升高,土壤动物对黄花亚菊和黑褐苔草凋落叶有显著抑制作用(图 3);其他物种没有显著影响。海拔 4000m 高山草甸生态系统中,在融化期,随着温度的升高,土壤动物的活性提高以及剧烈的冻融循环和淋溶降解作用,导致在这一阶段凋落叶中易分解物质被降解,难分解物质残留较少[27],同时土壤动物在这一阶段通过取食腐殖物质,其肠道中的各种酶对腐殖质进行降解,因此在这一阶段土壤动物对凋落叶的腐殖化过程起到了一定的抑制作用。然而其他两个海拔凋落叶都是在高寒原始森林中,森林郁闭度较高冻融循环作用较弱导致凋落叶的腐殖化没有太大的变动。

经过整个冬季,土壤动物对海拔 3000、3600m 的高寒森林生态系统和海拔 4000m 的高山草甸生态系统中 6 种凋落叶的腐殖化过程都有一定的促进或抑制作用。研究发现初冻期和深冻期土壤动物对凋落叶有显著的促进作用,融化期凋落叶有显著的抑制作用。不同物种之间的腐殖化过程也有显著差异,这主要是由于在低温环境条件下,土壤动物和微生物对土壤环境及其变化的特殊适应与响应影响并决定着有机物质的矿质化与腐殖化过程[28]。同时,冬季温度变化以及土壤冻融循环间接影响了腐殖物质的累积。随着温度的降低,土壤动物的活动在一定程度上促进了凋落物腐殖化,增加了碳固定;随着温度的升高,土壤动物抑制了凋落物的腐殖化,增加了碳释放;为认识了高寒生态系统凋落物相关的土壤碳过程提供了一定的科学依据。

参考文献(References):

[1] Sollins P, Homann P, Caldwell B A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. Geoderma, 1996, 74(1/2): 65-105.

[2] Ono K, Hiradate S, Morita S, Ohse K, Hirai K. Humification processes of needle litters on forest floors in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) and Hinoki cypress(*Chamaecyparis obtusa*) plantations in Japan. Plant and Soil, 2011, 338(1/2): 171-181.

[3] 杨万勤, 张健, 胡庭兴, 孙辉. 森林土壤生态学. 成都: 四川科学技术出版社, 2006.

[4] Swift M J, Heal O W, Anderson J M. Decomposition in Terrestrial Ecosystems. Oxford: Blackwell Scientific, 1979.

[5] Wolters V. Invertebrate control of soil organic matter stability. Biology and Fertility of Soils, 2000, 31(1): 1-19.

[6] Wu F Z, Yang W Q, Zhang J, Deng R J. Litter decomposition in two subalpine forests during the freeze-thaw season. Acta Oecologica, 2010, 36(1): 135-140.

[7] 刘满强, 陈小云, 郭菊花, 李辉信, 胡锋. 土壤生物对土壤有机碳稳定性的影响. 地球科学进展, 2007, 22(2): 152-158.

[8] Ekschmitt K, Liu M Q, Vetter S, Fox O, Wolters V. Strategies used by soil biota to overcome soil organic matter stability—why is dead organic matter left over in the soil? Geoderma, 2005, 128(1/2): 167-176.

[9] 杨针娘, 刘新仁, 增群柱, 陈赞廷. 中国寒区水文. 北京:科学出版社, 2000.

[10] Campbell J L, Mitchell M J, Groffman P M, Christenson L M, Hardy J P. Winter in northeastern North America: a critical period for ecological processes. Frontiers in Ecology and the Environment, 2005, 3(6): 314-322.

[11] 谭波, 吴福忠, 杨万勤, 夏磊, 杨玉莲, 王奥. 川西亚高山/高山森林大型土壤动物群落多样性及其对季节性冻融的响应. 生物多样性, 2012, 20(2): 215-223.

[12] 潘红丽, 李迈和, 蔡小虎, 吴杰, 杜忠, 刘兴良. 海拔梯度上的植物生长与生理生态特性. 生态环境, 2009, 18(2): 722-730.

[13] Yang W Q, Wang K Y, Kellomäki S, Gong H D. Litter dynamics of three subalpine forests in western Sichuan. Pedosphere, 2005, 15(5): 653-659.
[14] 谭波, 吴福忠, 杨万勤, 杨玉莲, 王奥, 康丽娜. 雪被去除对川西高山森林冬季土壤温度及碳、氮、磷动态的影响. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2553-2559.
[15] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, Setälä H, van der Putten W H, Wall D H. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. Science, 2004, 304(5677): 1629-1633.
[16] Ni X Y, Yang W Q, Li H, Xu L Y, He J, Tan B, Wu F Z. The responses of early foliar litter humification to reduced snow cover during winter in an alpine forest. Canadian Journal of Soil Science, 2014, 94(4): 453-461.
[17] Richard G, Guyot G, Aguer J P, Ter Halle A, Trubetskaya O E, Trubetskoi O A. Role of fractionation in studying the photochemical properties of humic substances. Russian Journal of General Chemistry, 2008, 78(11): 2265-2272.
[18] 张晋京, 窦森, 李翠兰, 王淑华. 土壤腐殖质分组研究. 土壤通报, 2004, 35(6): 706-709.
[19] 尹文英. 中国土壤动物. 北京: 科学出版社, 2000: 1-2.
[20] 单军, 季荣. 土食性大型土壤动物转化土壤有机碳的^{14}C示踪法应用研究进展. 土壤, 2008, 40(6): 863-871.
[21] 李国平, 杨鹭生, 王宇晴, 赵林艳, 汤婉君. 不同微生物菌剂对芒萁秸秆腐熟过程中腐殖质构成的影响. 热带作物学报, 2015, 36(4): 719-723.
[22] 倪祥银, 杨万勤, 徐李亚, 何洁, 李晗, 吴福忠. 雪被斑块对高山森林凋落叶腐殖化过程中胡敏酸和富里酸累积的影响. 土壤学报, 2014, 51(5): 1138-1152.
[23] 窦森, Tardy Y, 张晋京, 李凯, 于水强, 平立凤, 关松, 侯素艳, 林学巍, 高娴. 土壤胡敏酸与富里酸热力学稳定性及其驱动因素初步研究. 土壤学报, 2010, 47(1): 71-76.
[24] Cotrufo M F, Wallenstein M D, Boot C M, Denef K, Paul E. The microbial efficiency-matrix stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter?. Global Change Biology, 2013, 19(4): 988-995.
[25] Briones M J I, Ineson P, Piearce T G. Effects of climate change on soil fauna; responses of enchytraeids, diptera larvae and tardigrades in a transplant experiment. Applied Soil Ecology, 1997, 6(2): 117-134.
[26] 李萌, 吴鹏飞, 王永. 贡嘎山东坡典型植被类型土壤动物群落特征. 生态学报, 2015, 35(7): 2295-2307.
[27] 倪祥银, 杨万勤, 李晗, 徐李亚, 何洁, 吴福忠. 雪被斑块对川西亚高山森林6种凋落叶冬季腐殖化的影响. 植物生态学报, 2014, 38(6): 540-549.
[28] 蔡晓布, 彭岳林, 魏素珍, 于宝政. 高寒草原土壤有机碳与腐殖质碳变化及其微生物效应. 土壤学报, 2014, 51(4): 834-844.